بررسی تجربی تاثیر فرکانس بال‌زدن بر نیروهای آیرودینامیکی ناپایای یک بال‌زن*

کریم مظاهری(۱) عباس ابراهیمی(۲)

چکیده *پرنده‌های مکانیکی بال‌زن، نیروهای آیرودینامیکی برآ و پیشران لازم برای پرواز خود را به‌کمک حرکت بال‌زدن بال‌هایی انعطاف‌پذیر تأمین می‌کنند. در این مقاله، برای تولید حرکت بال‌زدن از مکانیزمی چهارمیله‌ای به‌همراه بال‌هایی انعطاف‌پذیر استفاده شده است و سپس اندازه‌گیری نیروهای آیرودینامیکی و اینرسی ناشی از حرکت بال‌زدن بال‌های بال‌زن نمونه به کمک بالانس نیرویی داخلی انجام‌شده است. بالانس نیرویی استفاده‌شده دارای شش مؤلفه‌ی اندازه‌گیری است و ضرایب کالیبراسیون آن با اعمال بارهای مشخص و ثبت ولتاژ خروجی کرنش‌سنج‌ها سپس استفاده از روش حداقل مربعات و برازش منحنی بین ولتاژ خروجی و نیروهای اعمالی به‌دست‌آمده است. نتایج مربوط به کالیبراسیون و رفتار بالانس ارایه شده‌است. بال‌زن در حالت بدون باد نیز نیروهای آیرودینامیکی تولید می‌کند لذا در این مرحله از تحقیق برای کاهش پیچیدگی‌های ناشی از به‌کارگیری تونل‌باد، اندازه‌گیری بدون باد رو به جلو و به عبارت دیگر در حالت پرواز ایستا انجام شده است. اندازه‌گیری نیروهای برآ و پیشران برای فرکانس‌های بال‌زدن مختلف انجام شده و در انتها با تحلیل نتایج، رفتار این نیروها در حرکت بال‌زدن بال‌ها شناسایی شده است.*

واژه‌های کلیدی بال‌زن، بال‌زدن، اندازه‌گیری نیروی ناپایا.

Experimental Investigation on Effect of Flapping Frequency on Aerodynamic Forces of Ornithopters

A. Ebrahimi K. Mazaheri

Abstract *Ornithopters, or mechanical birds, produce lift and thrust through flapping motion of their wings. Many factors affect this physical phenomenon, and here we investigate effect of flapping frequency on aerodynamic and inertial forces. A six component measurement balance is used here, which is calibrated using a standard loading procedure, which uses a least squares curve fitting. A stand is designed to hold the flapping wing system during the test. A data acquisition system is set up to record important data with acceptable sampling frequency. Aerodynamic performance of the vehicle for hovering (i.e. no wind) situation is investigated. Produced lift and thrust are measured for different flapping frequency, and shows the aerodynamic forces are affected by elastic deformation and inertial flapping forces. This information are being used for validation of unsteady flow simulations needed for engineering design of ornithopters, and will be used for design optimization, as well.*

Key Words Flapping wing, Unsteady forces, Measurement.

---

*نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۷/۹/۱ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۸/۱۰/۱۹ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، استاد، قطب علمی سامانه‌های هوافضایی، دانشگاه صنعتی شریف

(۲) دانشجوی دکترا، قطب علمی سامانه‌های هوافضایی، دانشگاه صنعتی شریف

مقدمه

روش غالب تولید نیروهای برآ و پیشران در پرواز طبیعی پرندگان، بال‌زدن است. مثال‌های فراوان موجود در طبیعت، مانند پرواز پرندگان هم گواهی می‌دهد که بال‌زدن روشی بسیار کارآمد برای پرواز در سرعت‌های پایین است. در سال‌های اخیر، پرواز با بال‌زدن اهمیت قابل توجهی پیدا کرده است. بال‌زن پرنده‌ای مکانیکی است که مانند پرندگان، به‌کمک بال‌هایی انعطاف‌پذیر و مکانیزمی که حرکت بال‌زدن را فراهم می‌نماید، به‌طور هم‌زمان هر دو نیروی آیرودینامیکی برآ و پیشران لازم برای پرواز خود را تولید می‌کند. برخلاف پرنده‌های بال- ثابت، آیرودینامیک پرواز با بال‌زدن هنوز موضوعی ناشناخته است و قوانین ساده‌ای برای طراحی بال‌زن دردسترس نیست؛ لذا برای طراحی اولیه‌ی این سامانه از تدوین روابط نیمه‌تجربی می‌توان استفاده نمود. مشخصات عمومی پرندگان دارای ویژگی‌های مشترک فراوانی هستند و این ویژگی‌ها در بعضی ماشین‌های پرنده نیزمشاهده می‌شود. مطالعات فراوانی برای شناخت این ویژگی‌ها صورت‌گرفته است که اساس آن ها بر تحلیل ابعادی و مطالعه‌ی مقیاس‌ها ست. روابط نمایی و نتایج حاصل از این مطالعات بین پارامترهای عملکردی و جرم پرنده،می تواند ابزار مفیدی در طراحی اولیه‌ی بال‌زن می‌تواند باشد [1].

درطراحی سامانه‌های بال‌زن، مهم‌ترین زیرمجموعه، بال انعطاف‌پذیر است.هنگامی‌که بال به صورت تناوبی و با شتاب متغیر در محیط، حرکت بال‌زدن را انجام می‌دهد، نیروهای ناپایای آیرودینامیکی و اینرسی تولید می‌شوند که تابع سینماتیک حرکت، توزیع جرم بال، خواص مواد و طرح بال هستند. در حرکت بال‌زدن این نیروها باعث خمش و پیچش بال و درنتیجه تغییرشکل انفعالی(Passive Wing Deformation) آن می‌شوند که روی عملکرد پرواز اثر می‌گذارند. این تغییرشکل انفعالی باید با طرح سازه و خواص مواد بال کنترل شود. به‌عبارتی، طرح سازه‌ی بال و مواد آن باید به‌گونه‌ای باشد که اجازه ی تغییرشکل‌های معینی را برای بال به‌وجود آورد تا این‌که بال نیروهای آیرودینامیکی مطلوب را با حداقل توان‌مصرفی تولید نماید [2]؛ بنابراین تحلیل آیروالاستیسیته، ترکیب آیرودینامیک ناپایا و الاستیسیته‌ی بال، در توصیف حرکت بال‌زدن نقش مهمی دارد. انجام تحلیل آیروالاستیسیته، نیازمند الگوی آیرودینامیک ناپایای مناسب برای ترکیب با معادلات الاستیسیته‌ی سازه است. ازطرفی الگوهای آیرودینامیکی موجود، از دقت و یا سرعت کافی برای تحلیل مسأله‌ی بال‌زدن برخوردار نیستند؛ لذا برای تایید و اعتبارسنجی تحلیل‌های آیرودینامیکی که در طراحی بال‌زن مورد استفاده قرار می‌گیرند، مطالعه‌ی تجربی ضرورت دارد. فعالیت‌های تحقیقاتی تجربی معدودی برای مطالعه‌ی متغیرهای بال در حرکت بال‌زدن انجام شده است. به‌طور کلی این متغیرها شامل سه دسته‌ی هندسه یا طرح بال (مانند نسبت منظری)، سینماتیک حرکت بال‌زدن (مانند فرکانس بال‌زدن، دامنه‌ی بال‌زدن، منحنی سرعت‌زاویه‌ای) و جنس سازه‌ی بال (مانند سختی پیچشی و خمشی بال) هستند. به‌کمک مطالعه‌ی تجربی می‌توان رفتار این متغیرها را در کمینه‌کردن توان مصرفی، برای تولید نیروهای آیرودینامیکی لازم برای پرواز، بررسی نمود.

در [3] برای حرکت بال‌زدن، بالی نمونه در سرعت‌های متفاوت باد و همچنین فرکانس‌های مختلف بال‌زدن،اندازه‌گیری متوسط نیروهای برآ و پیشران انجام شده است. از این نتایج برای اعتبارسنجی تخمین نیروهای آیرودینامیک با روابط تحلیلی روش مرجع [4] استفاده شده است. درفعالیت دیگری [5,6] مطالعه ی تجربی عملکرد آیرودینامیک ناپایای بال‌زدن بال‌هایی از جنس سازه‌ی متفاوت انجام شده و مقدار نیروی برآ، پیشران و توان مصرفی در تونل باد بررسی شده است. هدف از این مطالعه، یافتن فهم بهتری از عوامل کلیدی در توسعه ی بال‌های بهینه برای ایجاد مزیت

آیرودینامیکی در پرواز بال‌زن بوده است. نشان داده شده است که برای بال‌هایی با اندازه‌ی یکسان، بال‌هایی با لبه‌ی جلویی صلب ضریب نیروی برآی بیشتری در مقایسه با لبه‌های انعطاف‌پذیر تولید می‌کنند و انعطاف‌پذیری در راستای دهانه‌ی بال، باعث افت شدید در نیروی برآی ناپایا می‌شود.همچنین انعطاف‌پذیری در راستای وتر بال، عامل مهمی در تولید نیروی پیشران بال‌زن است. در [7] نیز اندازه‌گیری نیروهای برآ و پیشران بال‌زنی در فرکانس بال‌زدن، سرعت باد و زاویه ی حمله‌های متفاوت، انجام شده است. نشان‌داده شده، زاویه ی حمله و سرعت نسبی باد، بیشترین اثر را در تولید نیروی برآ دارد. همچنین در یک فرکانس بال‌زدن، با کاهش زاویه‌ی حمله، سرعت پرواز زیاد می‌شود.

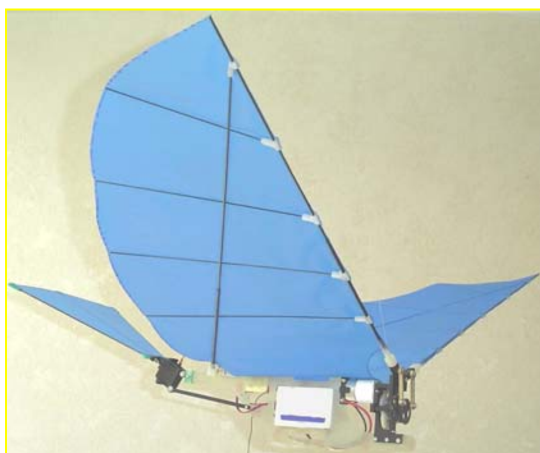
در این مقاله اندازه‌گیری نیروهای آیرودینامیکی و اینرسی ناشی از حرکت بال‌زدن بال‌های بال‌زن نمونه‌ای در پرواز ایستا به‌کمک بالانس داخلی صورت‌گرفته است. همچنین بالانس شش مؤلفه‌ی مورد استفاده، به‌طور استاتیکی کالیبره شده است. نتایج اندازه‌گیری نیروهای برآ و پیشران برای فرکانس‌های بال‌زدن مختلف ارائه و تحلیل آن‌ها انجام شده است. از نتایج تجربی حاصل شده در این تحقیق، برای اعتبارسنجی و اصلاح شبیه‌سازی‌های کارهای گذشته [۸ و ۹] بهره‌گیری خواهد شد.

معرفی بال‌زن نمونه

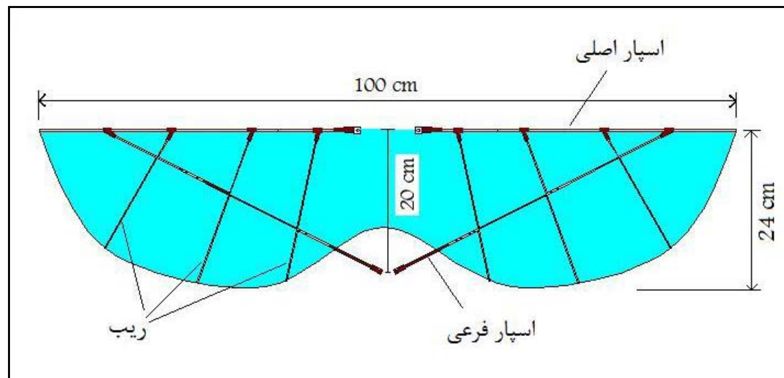
بال‌زن نمونه‌ی ساخته شده و مورد مطالعه در این مقاله، بال‌زن تدبیر نشان داده شده در شکل (۱) است که طراحی اولیه‌ی آن در [۱۰] صورت گرفته است. این بال‌زن دارای بال‌هایی به صورت صفحه‌ی صاف و یا پوسته‌ای شکل (Membrane Wing) است که طول دهانه‌ی بال‌ها ۱۰۰ سانتی‌متر و متوسط وتر آن‌ها نیز حدود ۱۷ سانتی‌متر است. طرح سازه‌ی بال، مطابق شکل (۲) شامل اسپار اصلی (لبه جلویی بال)، اسپار فرعی و تعدادی ریب از جنس میله‌های کربنی است. مهم‌ترین اجزای این بال‌زن، بال انعطاف‌پذیر، مکانیزم بال‌زدن، جعبه‌دنده، موتور و باتری است. از باتری لیتیم پلیمر به‌عنوان منبع، انرژی و از موتورالکتریکی جریان مستقیم به‌همراه جعبه دنده برای تولید نیروی بال‌زدن استفاده می‌شود. همچنین از مکانیزم چهارمیله‌ای نامتقارن، مطابق شکل (۳)، برای تبدیل حرکت دورانی موتور به حرکت تناوبی بال‌زدن استفاده شده است. برخی دیگر از مشخصات این سامانه در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱ مشخصات بال‌زن نمونه

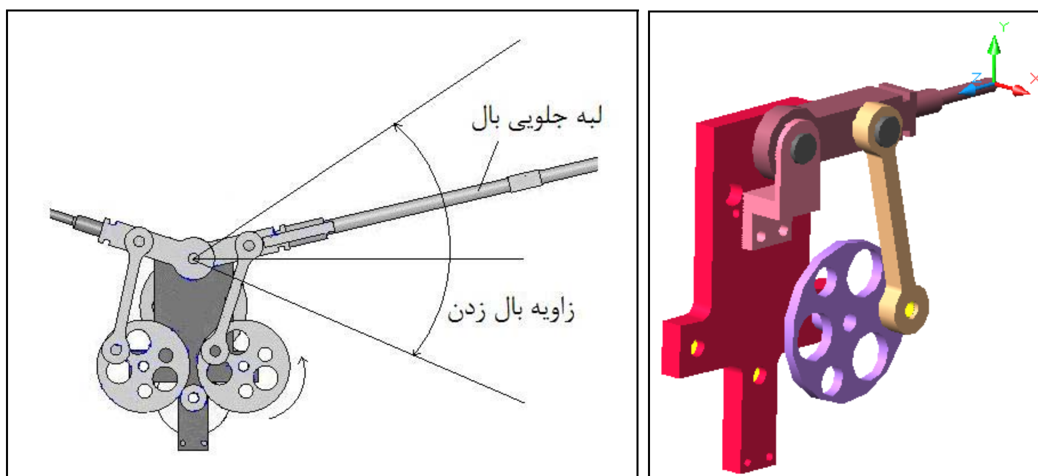
متغیر	مقدار
دهانه ی بال (سانتی‌متر)	۱۰۰
نسبت منظری بال	٦
حداکثر زاویه‌ی بالارفتن بال نسبت به افق (درجه)	٣٦
حداکثر زاویه‌ی پایین‌آمدن بال نسبت به افق (درجه)	۳۲
فرکانس بال زدن (هرتز)	صفر تا ۸



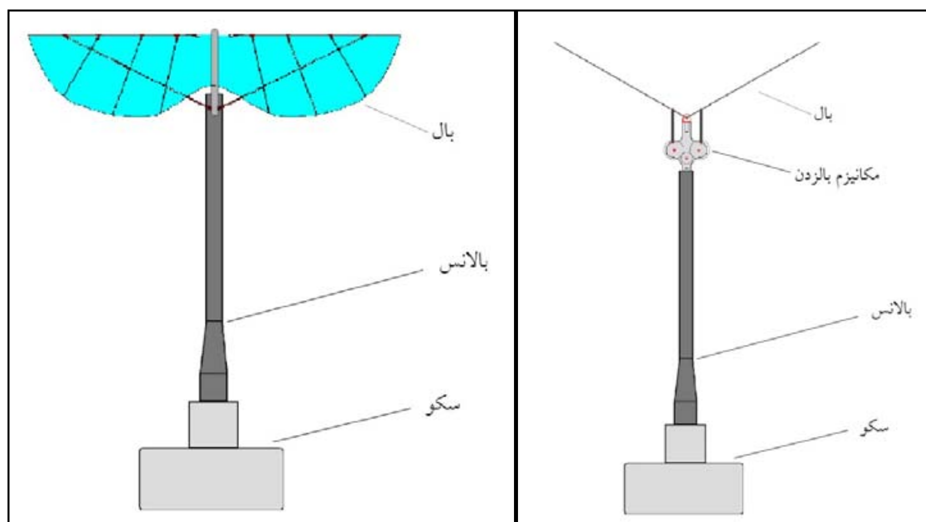
شکل ۱ بال‌زن تدبیر



شکل ۲ طرح بال پوسته‌ای (Membrane wing)



شکل ۳ مکانیزم بال‌زدن و زاویه‌ی عملکرد



ب		الف

شکل ٤ چیدمان آزمایش و حالت‌های ممکن نصب بال‌زن نمونه روی بالانس

بالانس نیرو

هر جسم پرنده در حال پرواز، دارای شش‌درجه آزادی است و می‌تواند در راستا و حول سه محور مختصات حرکت کند. دینامیک پرواز پرنده، بستگی به نیروها و گشتاورهای در راستا و حول این سه محور عمود برهم دارد. بارها و گشتاورهای اعمالی به یک پرنده به دو دسته‌ی کلی؛ بارهای استاتیکی و دینامیکی تقسیم می‌شود. بارگذاری استاتیکی، نتیجه ی حرکت جریان هوا روی مدل در شرایطی است که موقعیت جسم نسبت به جریان با گذشت زمان ثابت باشد و بارهای دینامیکی، نتیجه ی هر حرکتی از مدل نسبت به جریان از جمله شتاب خطی جسم یا تغییر زوایا ست. بال‌زن با حرکت بال‌زدن بال‌ها، نیروهای محوری و عمودی نسبت به بدنه‌ی پرنده تولید می‌کند. به‌علت تغییر پیوسته‌ی سرعت و شتاب‌زاویه‌ای بال در یک دوره‌ی تناوب بال‌زدن، نیروهای محوری و عمودی نیز پیوسته در طول مسیر پایین آمدن و بالا رفتن بال، تغییر می‌کند. نیروی محوری پرنده عمدتاً نیروی آیرودینامیکی پیشران است؛ در حالی‌که نیروی عمودی، ترکیبی از نیروهای اینرسی و آیرودینامیکی برآ است.

برای اندازه‌گیری دقیق بارهای اعمالی روی یک مدل در تونل باد، یعنی نیروها و گشتاورها، از وسایلی به نام بالانس استفاده می‌شود. بالانس‌ها از دیدگاه روش اندازه‌گیری بارهای اعمالی و موقعیتشان به دو دسته‌ی؛ بالانس خارجی و بالانس داخلی تقسیم می‌شود. در بالانس‌های خارجی نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی با مکانیزم خاصی به بیرون از محفظه ی آزمون تونل انتقال داده و اندازه‌گیری می‌شود. در بیشتر حالت‌ها، به‌ویژه در جریان‌های با سرعت‌های بالا، نمی‌توان از نیروی پسای نگه‌دارنده‌های این نوع بالانس صرف نظر کرد. در این نوع بالانس‌ها، کاهش نیروی پسا خیلی با اهمیت است. در مقابل، بالانس داخلی بارها را در داخل تونل باد، اندازه‌گیری می‌کند و سیگنال‌های مربوط به هر نیرو را به خارج از تونل انتقال می‌دهد. شکل ظاهری بالانس داخلی شبیه تیری یکسرگیردار است که در انتها بارگذاری شده باشد. روش اندازه‌گیری بالانس با استفاده از قوانین حاکم بر کرنش‌سنج‌ها ست که روی پوسته‌ی خارجی آن چسبانده می‌شود. کرنش‌سنج مقاومتی الکتریکی است که تغییر طول در آن باعث تغییر مقاومت شده و با استفاده از تغییر ولتاژ ناشی از تغییر مقاومت، می‌توان مقدار تنش و کرنش را روی سطح، اندازه‌گیری نمود.

بالانس‌های داخلی، دارای مزایای زیادی هستند و از آنها به طور گسترده در تونل‌های باد استفاده می‌شود. اولین مزیت، مربوط به سادگی روش اندازه‌گیری است؛ زیرا بارهای اعمالی به‌طور مستقیم به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل‌شده و با استفاده از ضرایب کالیبراسیون به مقدار نیروی متناظر تبدیل می‌شوند. دومین مزیت، نبودن بازوهای مزاحم در محفظه ی آزمون (برخلاف بالانس خارجی) و عدم ایجاد نیروهای آیرودینامیکی مزاحم است که باعث می‌شود بارهای مورد اندازه‌گیری خطای کم‌تری داشته باشند. مزیت دیگر، این است که بالانس‌هایی که براساس قوانین کرنش‌سنج بنا نهاده شده‌اند، سرعت پاسخ سریعی داشته و اندازه‌گیری نیروها در کم‌تر از یک هزارم ثانیه به‌طول می‌انجامد. باتوجه به این‌که در این مقاله اندازه‌گیری نیروهای آیرودینامیکی بال‌زن نمونه در حالت بدون باد رو به جلو و یا پرواز ایستا مورد نظر است، بنابراین از نظر بازوهای مزاحم، انتخاب نوع بالانس تفاوتی ندارد، ولی به علت مزیت‌های دیگر بالانس داخلی که در بالا ذکرشد، از این نوع بالانس استفاده شده است.

شکل (٤) شماتیک چیدمان آزمایش برای دو حالت ممکن نصب بال‌زن نمونه روی بالانس را نشان می‌دهد. در حالت الف، بال‌زن به‌گونه‌ای روی بالانس نصب شده است که نیروی عمودی بال‌زن (نیروی آیرودینامیکی برآ) در راستای محور بالانس و نیروی محوری آن (پیشران) در راستای عمود بر محور بالانس است. در حالت ب، بال‌زن و بالانس به گونه‌ای نصب

شده‌اند که راستای محور، هر دو موازی هستند. شکل (۵) تصویر حالت ب را نشان می‌دهد.



شکل ۵ حالت (ب) نصب بال‌زن روی بالانس

کالیبراسیون بالانس نیرو

در این بخش، نتایج کالیبراسیون بالانس شش مؤلفه‌ی استفاده شده ارائه شده است. بالانس، همانند دیگر ابزار آلات اندازه‌گیری، نیاز به کالیبراسیون دارد. کالیبراسیون بالانس داخلی به دلایل زیر انجام می‌شود: تعیین محدوده خطی رفتار بالانس، تعیین ضرایب بالانس، کنترل و ارزیابی قابلیت تکرار در بازه‌ی زمانی کوتاه، کنترل و ارزیابی پایداری در بازه‌ی زمانی بلند، تعیین حساسیت یا کم‌ترین نیرو برای پاسخ دادن و تعیین پسماند. در بالانس الکتریکی داخلی با استفاده از کرنش‌سنج‌ها و تغییر طول متناسب با بار اعمالی، ولتاژ تغییر می‌نماید. ولتاژ خروجی با استفاده از روش کالیبراسیون به نیروهای اعمالی تبدیل می‌گردد. برای این کار از برازش منحنی‌ها استفاده می‌نماییم که ضرایب این منحنی‌ها در فرآیند کالیبراسیون مشخص می‌شوند. این ضرایب با اعمال بارهای مشخص و ثبت ولتاژهای خروجی و سپس گذراندن بهترین منحنی به دست می‌آیند. مرتبه‌ی کالیبراسیون به درجه‌ی منحنی انتخاب شده بستگی دارد. با نصب بالانس روی سکوی مخصوص، امکان اعمال بار در جهات مؤلفه‌های قابل اندازه‌گیری توسط بالانس فراهم می‌شود. در این‌جا از روش حداقل مربعات برای به دست آوردن ضرایب کالیبره استفاده شده است. در این روش با استفاده از حداقل مربع تفاضل نتایج به دست آمده از تابع منحنی انتخاب شده و مقادیر تجربی، ضرایب چند جمله‌ای مورد نظر به‌دست می‌آید.

حس‌گرهای بالانس، نسبت به بارهای اعمالی دارای دو نوع اثر مستقیم و اثر متقابل هستند. اثر مستقیم، شامل تغییر رفتار خروجی حس‌گرها نسبت به هر کدام از نیروها و گشتاورهای مربوطه‌شان است. اثر متقابل در حالتی است که با اعمال نیرو در جهت یک مؤلفه، حس‌گرهای مربوط به مؤلفه‌های دیگر نیروها نیز متأثر شده و تغییر می‌کنند. به‌عنوان مثال، وقتی فقط نیروی عمودی اعمال می‌شود، علاوه بر حس‌گرهای متعلق به آن، حس‌گرهای نیروی جانبی و گشتاور غلطش (رول) نیز تغییر می‌کند. به این تأثیر نیروهای دیگر بر حس‌گرهای غیر، اثر متقابل گفته می‌شود و بایستی ضرایب کالیبراسیون آن‌ها نیز محاسبه شود. اثر متقابل به دلیل وجود خطاهای ناشی ازساخت، مونتاژ، چسباندن کرنش‌سنج‌ها و اعمال نامناسب بار به‌وجود می‌آید. ماتریس ضرایب کالیبراسیون، شامل ضرایب مستقیم و اثر متقابل می‌باشد که با اعمال بار خالص و بار ترکیبی به بالانس قابل محاسبه است.

بالانس را در راستای نیروهای: محوری، عمودی، جانبی و گشتاورهای وارد بر آن، کالیبره می‌کنیم. برای اندازه‌گیری دقیق بارهای اعمالی روی مدل، بایستی محدوده‌ی نیرویی مناسب جهت کالیبراسیون را تعیین نمود و سپس بالانس موردنظر در محدوده‌ی مذکور کالیبره شود. این محدوده‌ی نیرویی از طریق روش‌های محاسباتی (تحلیلی، عددی) نیروهای آیرودینامیکی بال‌زدن [۸ و ۹] و یا نتایج تجربی فعالیت‌های دیگران

[7]، قابل تخمین است. در این ناحیه، بالانس باید به صورت الاستیک و خطی عمل کند. در این جا با استفاده از نتایج به دست آمده از روش محاسباتی نویسندگان در مرجع [۸ و ۹]، محدوده‌ی بارگذاری برای نیروی محوری ۱٫۳ Kg- تا ۱٫۳ Kg و نیروهای عمودی و جانبی مابین ۰٫۵ Kg- تا ۰٫۵ Kg انتخاب‌شده است. اعمال بار به صورت رفت و برگشتی (بارگذاری و باربرداری) انجام شده است. به‌دلیل مشخص نبودن محل دقیق اعمال بار عمودی (بر محور بالانس) و جانبی روی مدل، نمی‌توان بالانس را به طور مستقیم برحسب این نیروها کالیبره نمود؛ به‌همین دلیل بارگذاری در دو نقطه‌ی معین روی بالانس انجام می‌شود و سپس از تقسیم تفاضل گشتاورهای معادل این نیروها بر فاصله‌ی دو حس‌گر متناظرشان، این نیروها به دست می‌آیند.

شکل‌های (٦) و (٧) نتایج کالیبراسیون و یا پاسخ خروجی حس‌گرهای نیرویی بالانس را نسبت به اعمال بارهای محوری (F_a) و عمودی (M_y) نشان می‌دهد. اطلاعات در دو حالت بارگذاری و باربرداری ثبت شده است.

در شکل (٦)، تغییرات ولتاژ خروجی حس‌گرهای نیرویی بالانس نسبت به اعمال نیروی محوری آمده است. نقاط در راستای خط مورب، پاسخ حس‌گر مؤلفه‌ی محوری بالانس را نسبت به اعمال بار مربوطه‌اش (بار محوری) نشان می‌دهد. مطابق این نتایج، نقاط ثبت شده در حالت رفت و برگشت با دقت خوبی با هم سازگاری داشته و نشان از رفتار الاستیک سازه و حس‌گر در این محدوده‌ی نیرویی دارد.

نقاط در راستای خط عمودی شکل (٦)، پاسخ سایر حس‌گرها را نسبت به اعمال بار محوری نشان داده‌اند. با توجه به نتایج، اعمال بار به حس‌گر مؤلفه‌ی محوری بالانس، نسبتاً اثری روی دیگر مؤلفه‌ها ندارد؛ زیرا با اعمال بار محوری به بالانس، سایر حس‌گرها مقداری خیلی نزدیک به صفر را نشان می‌دهد.

در شکل (٧)، تغییرات ولتاژ خروجی حس‌گرهای نیرویی بالانس نسبت به اعمال نیروی عمودی آمده است. نقاط در راستای خط موربِ، پاسخ حس‌گر مؤلفه‌ی عمودی بالانس را نسبت به اعمال بار مربوطه‌اش (بار عمودی) نشان می‌دهد.

این نتایج نیز نشان می‌دهد، نقاط ثبت شده در حالت رفت و برگشت با دقت مناسبی با هم سازگاری داشته و حس‌گر در این محدوده‌ی نیرویی رفتار الاستیک دارد؛ بنابراین تغییرات ولتاژ برحسب بار (نیرو یا گشتاور) خطی بوده و این رفتار خطی نشان دهنده ی مناسب بودن عملکرد حس‌گر مربوطه و فرآیند اعمال بار به بالانس است. نقاط، در راستای خط عمودی شکل (٧)، پاسخ سایر حس‌گرها را نسبت به اعمال بار عمودی نشان داده‌اند. با توجه به نتایج، اعمال بار به حس‌گر مؤلفه‌ی عمودی بالانس، اثر اندکی روی دیگر مؤلفه‌ها دارد و دارای دقت کافی است.

انجام آزمایش

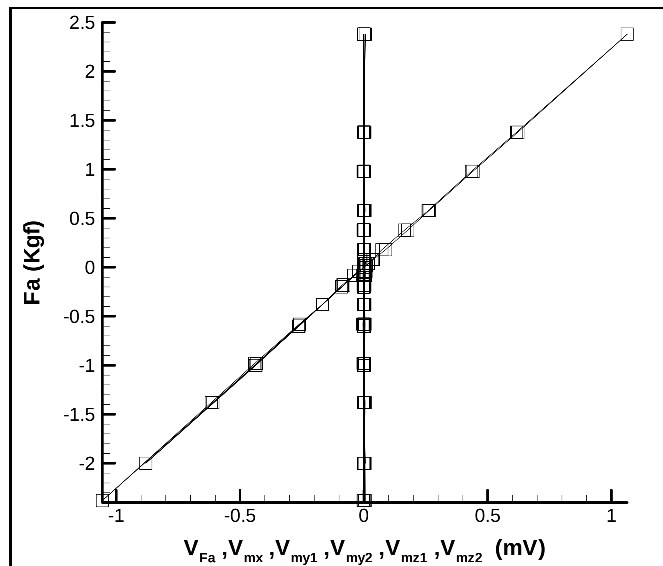
نصب بال‌زن بر روی بالانس در دو حالت امکان پذیر است که در شکل (٤) نشان داده شده است.

در حالت الف، بال‌زن به‌گونه‌ای روی بالانس نصب شده است که نیروی عمودی بال‌زن (نیروی آیرودینامیکی برآ) در راستای محور بالانس (سنسور نیروی محوری بالانس) و نیروی محوری آن (نیروی پیشران) در راستای عمود بر محور بالانس (سنسور نیروی عمودی بالانس) است.

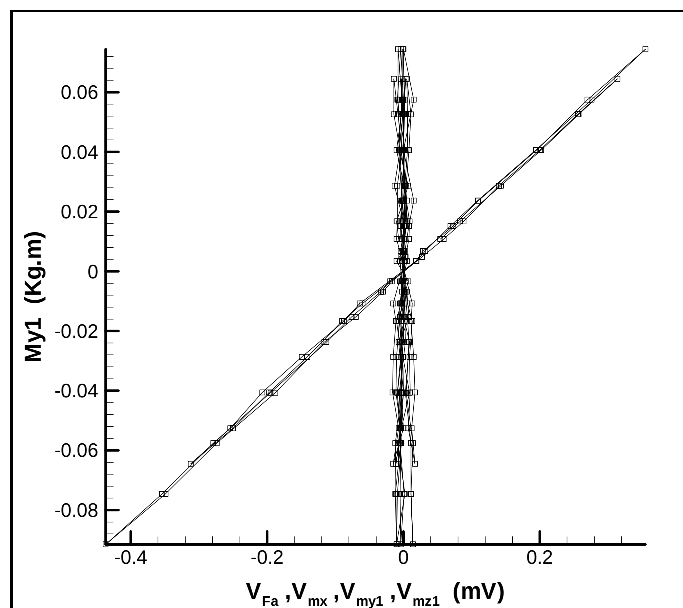
در حالت ب، بال‌زن و بالانس به گونه‌ای نصب شده‌اند که راستای محور هر دو، موازی هستند؛ لذا در این حالت سنسور محوری بالانس، نیروی پیشران و سنسور عمودی آن، نیروی برآ را نشان می‌دهد.

در این مقاله نتایج انجام آزمایش اندازه‌گیری نیروهای آیرودینامیک و اینرسی تولیدشده در حرکت بال‌زدن بال‌های بال‌زن نمونه در هر دو حالت فوق ارائه شده است. از تطابق و برابری نسبی نتایج به دست آمده

در دو حالت، برای اعتبار سنجی نتایج آزمایش و عملکرد بالانس استفاده شده است؛ به‌عبارتی، نیروی محوری بالانس (نیروی برآی بال‌زن) در حالت الف باید با نیروی عمودی بالانس (نیروی برآی بال‌زن) در حالت ب یکسان باشد و همچنین نیروی عمودی بالانس (نیروی پیشران بال‌زن) در حالت الف باید با نیروی محوری بالانس (نیروی پیشران بال‌زن) در حالت ب یکسان باشد. اختلاف نتایج این دو حالت به صورت خطای عملکرد بالانس تجزیه و تحلیل شده است.



شکل ٦ تغییرات ولتاژ خروجی حس‌گرهای نیرویی بالانس نسبت به اعمال نیروی محوری



شکل ۷ تغییرات ولتاژ خروجی حس‌گرهای نیرویی بالانس نسبت به اعمال نیروی عمودی

در هـر دو حالـت، انـدازه‌گیـری نیروهـا در فرکانس‌های مختلف از بال‌زدن بال‌ها انجام شده است. نیروهـای انـدازه‌گیـری شـده، در واقـع عکس‌العمـل دینامیکی سکو نسبت به ترکیب نیروی آیرودینـامیکی و نیروی اینرسی ناشی از بـال‌زدن بـال و شـتاب‌زاویـه‌ای اجزای مکانیزم بال‌زدن هستند. باتوجه به این که هردوی این نیروها نوسانی هـستند؛ بنـابراین تحریکـی نوسـانی روی بـالانس وجـود دارد. بـالانس بـا توجـه بـه مشخصه‌هـای ثابـت خـود، مثـل جـنس و هندسـه، بـه تحریک اعمال شده روی آن پاسـخ مـی‌دهـد. در برخـی شرایط، مقدار دامنه یـا فرکـانس عکس‌العمـل دینـامیکی سکو تفاوت بارزی نسبت بـه تحریـک خـارجی (ترکیـب نیروهای آیرودینامیکی و اینرسی) دارد. در چنین شرایطی، شناخت رفتار نیروی تحریک کـه مطلـوب اسـت، کـار ساده‌ای نخواهد بود.

نتایج به دست آمده از آزمایش‌هـای انجـام شـده نشان می‌دهند که در برخی حالت‌ها، رفتار بـال‌زن و در برخی حالت‌هـای دیگـر نیـز رفتـار دینـامیکی سـازه‌ی بالانس در خروجی به دست آمده حاکم شده است. باید توجه داشـت فرآینـد کالیبراسـیون بـالانس آن را بـرای بارگـذاری اسـتاتیکی کـالیبره نمـود و از آن‌جـا کـه کالیبراسـیون دینـامیکی بـرای بـالانس ممکـن نیـست (هرچند رفتار دینامیکی بالانس قابل بررسی اسـت) لـذا در اندازه‌گیری‌های ناپایای نیرویـی تـا وقتـی نتـایج بـه دست آمده قابل استفاده اند که بتوان مطمئن شد بالانس از خود رفتار دینامیکی نشان نمی‌دهد. در این‌جا بررسی مقدار فرکانس طبیعی سـازه‌ی بـالانس مـوردنظر نـشان می‌دهد که فرکانس بال‌زدن (یا فرکـانس تحریـک روی سازه‌ی بالانس) به اندازه‌ی کافی از آن دور است.

در ادامه بـا تحلیـل نتـایج حاصـل شـده، رفتـار دینامیکی نیروهای تولید شده در حرکت بال‌زدن بال‌هـا، مورد ارزیابی قرار گرفته اسـت. ایـن کـار بـا توجـه بـه شناخت و حس فیزیکی که از رفتار بال‌زن در طول یک دوره‌ی تناوب بال‌زدن وجـود دارد، انجـام شـده اسـت. همچنین برای اعتبارسـنجی نتـایج ایـن مـوارد در نظـر گرفته خواهد شد:

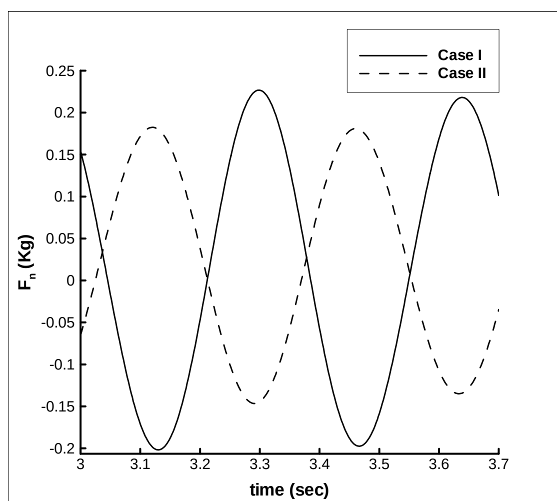
۱. از آن‌جا که نیروهای تولیـد شـده متناسـب بـا تغییـر مکان زاویه‌ای بال در طول یک دوره بال‌زدن به طور پیوسته تغییر می‌کند؛ لذا انتظار می‌رود فرکانس تغییر نیروها با فرکانس جابه‌جـایی زاویـه‌ای بـال، تناسـب داشته باشد.

۲. نتایج بـه دسـت آمـده در هـر دو حالـت از نحـوه‌ی قرارگیری بالانس و بال‌زن نـسبت بـه یکـدیگر بایـد یکسان باشد.

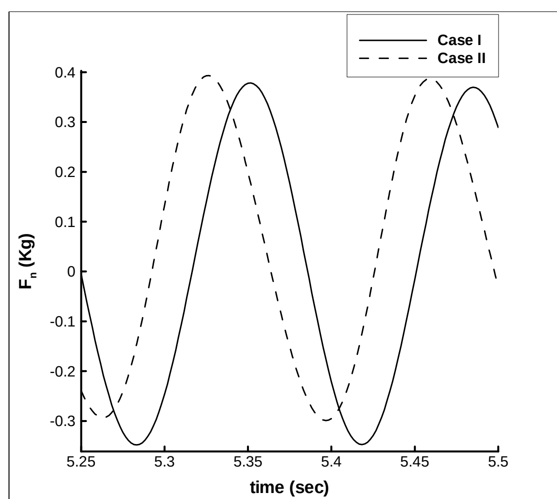
۳. با توجه به این که آزمایش‌هـا در شـرایط بـدون بـاد انجام می‌شود و همچنـین تقـارن نـسبی در حرکـت بالارفتن و پایین‌آمـدن بـال، بنـابراین انتظـار مـی‌رود نتایج مقدار متوسط نیروی عمودی بـال‌زن (بـرآ) در یک دوره‌ی تناوب بال‌زدن نزدیک صفر باشد.

٤. در شرایط آزمایش ذکر شده، در حرکـت بـالارفتن و پایین‌آمدن بال نیروی محوری (پیشران) مثبت تولیـد می‌شود؛ لذا انتظـار مـی‌رود در یـک دوره‌ی تنـاوب بـال‌زدن مقـدار متوسـط نیـروی محـوری بـال‌زن (پیشران)، مثبت باشد.

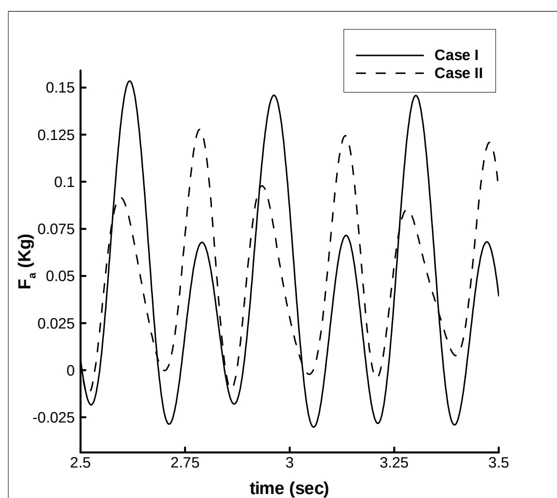
برای دریافت اطلاعات اندازه‌گیری شـده توسـط بالانس، از کارت داده‌برداری A/D مـدل PCL-818HG استفاده شده است. مدت زمان داده برداری برابر ٦ ثانیـه است که در این مدت، تعـداد ۳٦۰۰ داده نمونـه‌بـرداری می‌شود. نتایج و داده‌های خام بـه دسـت آمـده پـس از فیلتر شدن و حذف اغتشاشات اضافی مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرکانس فیلتر، معمولاً دو یا سه برابر فرکانس مود اول که از داده‌های FFT شده‌ی اطلاعـات خـام بـه دست می‌آید، انتخاب شده است.



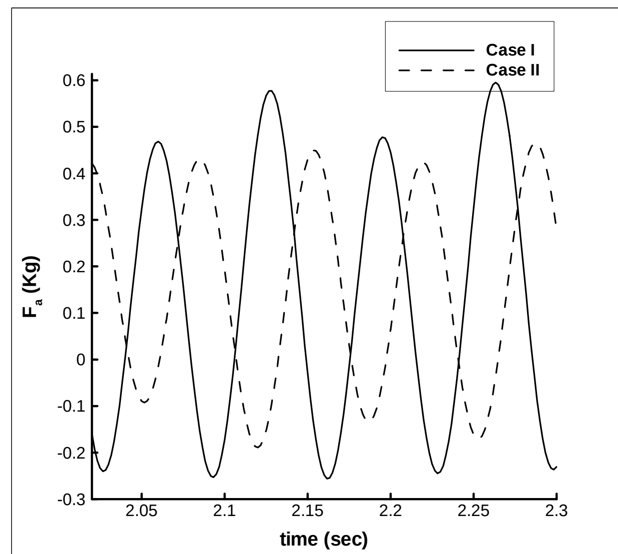
شکل ۸ نیروی عمودی بال‌زن در فرکانس بال‌زدن ۳ هرتز



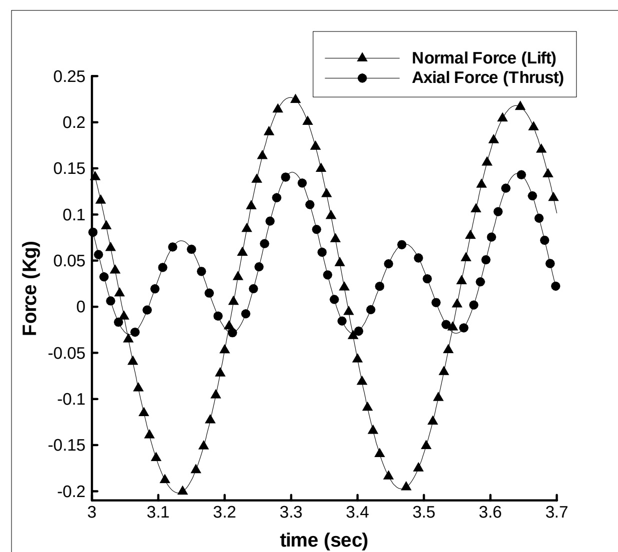
شکل ۹ نیروی عمودی بال‌زن در فرکانس بال‌زدن ۷/۶ هرتز



شکل ۱۰ نیروی محوری بال‌زن در فرکانس بال‌زدن ۳ هرتز



شکل ۱۱ نیروی محوری بال‌زن در فرکانس بال‌زدن ۷٫٦ هرتز



شکل ۱۲ نیروی عمودی و محوری بال‌زن در فرکانس بال‌زدن ۳ هرتز

نتایج

نتایج اندازه‌گیری نیروی عمودی بال‌زن (برآ) برای فرکانس بال‌زدن ۳ هرتز در حالت‌های الف و ب در شکل (۸) نشان داده شده است (تغییرات زمانی نیروی برآ در دو دوره‌ی تناوب و بازه‌ی زمانی ۰/۷ ثانیه). مقایسه‌ی انجام شده بین دو حالت اندازه‌گیری، نشان می‌دهد در هر دو حالت، فرکانس تغییر نیرو با فرکانس بال‌زدن برابر است. شکل تغییرات نیرو در دو حالت، شبیه به هم هستند، ولی دامنه‌ی نتایج در حالت ب حدود ۱۵ درصد از حالت الف کم‌تر است. مقدار نیروی متوسط عمودی بال‌زن در هر دو حالت، مثبت و بسیار کوچک می‌باشد (حدود ۲۰-۱۰ گرم). به همین

صورت نتایج اندازه‌گیری نیروی عمودی بال‌زن نمونه در فرکانس بال‌زدن ۷٫۶ هرتز در شکل (۹) آورده شده است. مقایسه‌ی نتایج، نشان می‌دهد فرکانس نتایج با فرکانس بال‌زدن برابر است. شکل تغییرات نیرو در دو حالت، یکسان و اختلاف دامنه‌ی تغییرات نیرو در دو حالت نیز کم‌تر از ٦ درصد است. مقدار نیروی متوسط عمودی در حالت الف کم‌تر از ۲۰ گرم و در حالت ب کم‌تر از ۵۰ گرم است. از مقایسه‌ی نتایج شکل‌های (۸) و (۹) حاصل می‌شود که مؤلفه‌های راستای محوری بالانس برای فرکانس بال‌زدن بالاتر که اندازه‌ی نیروها بیشتر است، نتایج بهتری ارائه می‌دهد. همچنین مثبت بودن مقدار متوسط نیروی عمودی بال‌زن نمونه می‌تواند ناشی از عدم تقارن سرعت و شتاب‌زاویه‌ای مکانیزم در طول مسیر بالارفتن و پایین‌آمدن بال باشد.

شکل (۱۰)، نتایج اندازه‌گیری نیروی محوری بال‌زن (رانش) در فرکانس بال‌زدن ۳ هرتز برای حالت‌های الف و ب را نشان می‌دهد. مقایسه‌ی انجام شده بین دو حالت اندازه‌گیری، نشان می‌دهد در هر دو حالت، فرکانس تغییر نیرو دو برابر مقدار فرکانس بال‌زدن است و در هر دو حرکت بالارفتن و پایین‌آمدن بال، نیروی محوری مثبت تولید می‌شود. شکل تغییرات نیرو در دو حالت یکسان است، ولی دامنه‌ی نتایج حدود ۲۰ درصد اختلاف دارند. مقدار متوسط نیروی محوری در حالت الف حدود ٤۰ گرم و در حالت ب حدود ۵۰ گرم است. همچنین نتایج اندازه‌گیری نیروی محوری در فرکانس بال‌زدن ۷٫٦ هرتز نیز در شکل (۱۱) آورده شده است.

مقایسه‌ی نتایج نشان‌می‌دهد که مانند قبل، فرکانس تغییر نیرو دو برابر مقدار فرکانس بال‌زدن است؛ زیرا بال در طی مسیر هر دو حرکت پایین‌آمدن و بالارفتن، نیروی محوری یا پیشران مثبت تولید می‌کند؛ بنابراین فرکانس نیروی محوری (پیشران) دو برابر فرکانس بال‌زدن و همچنین دو برابر فرکانس نیروی عمودی (برآ) است. شکل تغییرات نیرو در دو حالت یکسان است، ولی دامنه‌ی نتایج، حدود ۲۵ درصد اختلاف دارند. مقدار متوسط نیروی محوری در هر دو حالت، حدود ۱٤۰ گرم به دست آمده است.

جمع‌بندی نتایج شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان می‌دهد که در شرایط مختلف برای نیروی محوری (رانش) مقدار متوسط نسبتاً نزدیک و یا یکسانی به دست آمده است. مقدار منفی برای نیروی محوری تولید شده در برخی زمان‌ها، مربوط به رفتار دینامیکی پایه است و با افزایش فرکانس بال‌زدن، این اثرات اضافه می‌شوند. همچنین در حالتی‌که سختی پایه در راستای اعمال نیرو کم‌تر است، این پدیده بیشتر مشاهده می‌شود. نکته‌ی دیگری که در منحنی‌های نیروی محوری دیده می‌شود، این است که در یک دوره‌ی تناوب، بال‌زدن دو مقدار بیشینه‌ی محلی مشاهده می‌شود که مقدار یکی بیشتر از دیگری است.

در شکل (۱۲) نیروی عمودی و محوری بال‌زن به طور هم‌زمان در فرکانس بال‌زدن ۳ هرتز نشان داده شده است. می‌دانیم مقدار نیروی عمودی مثبت در مسیر پایین آمدن بال و مقدار نیروی عمودی منفی در حین بالارفتن بال، تولید می‌شود؛ بنابراین باتوجه به شکل (۱۲) بیشینه‌ی محلی نیروی محوری در پایین‌آمدن بال بیشتر از بیشینه‌ی این نیرو در بالارفتن بال است. علت این امر، بیشتر بودن سرعت زاویه‌ای بال در مسیر پایین‌آمدن نسبت به مسیر بالارفتن است. همچنین بیشترین بارگذاری (مجموع نیروی محوری و عمودی) روی بال در محلی از اواسط مسیر پایین‌آمدن بال اتفاق می‌افتد.

جمع‌بندی

اندازه‌گیری نیروهای عمودی (برآ) و محوری (پیشران) بال‌زن نمونه‌ای در فرکانس‌های بال‌زدن مختلف توسط یک بالانس داخلی انجام شد. از نتایج به دست آمده برای شناسایی رفتار این نیروها در حرکت بال‌زدن استفاده شد. نتایج، نشان داد فرکانس تغییرات نیروی برآ

برابر فرکانس بال‌زدن و فرکانس تغییرات نیروی رانش دو برابر فرکانس بال‌زدن است. امکان شبیه‌سازی نیروی برآ با یک تابع سینوسی ساده وجود دارد، ولی نیروی رانش حداقل دوهارمونیک برای برازش منحنی لازم دارد. دامنه‌ی نیروی برآ با افزایش فرکانس بال‌زدن زیاد می‌شود، ولی مقدار متوسط آن به طور نسبی ثابت باقی می‌ماند. دامنه‌ی نیروی رانش نیز با افزایش فرکانس بال‌زدن زیاد می‌شود و مقدار متوسط آن‌هم افزایش می‌یابد. برخلاف نیروی برآ، دامنه‌ی نیروی رانش در مسیر بالارفتن و پایین‌آمدن بال اختلاف دارد. مقدار نیروی رانش در مسیر پایین‌آمدن بال به واسطه‌ی بیشتر بودن سرعت زاویه‌ای بال، بیشتر است. در فرکانس بال‌زدن بالاتر، اثرات اینرسی در تغییر شکل‌های بال و تولید نیروهای آیرودینامیکی افزایش می‌یابد.

تشکر و قدردانی. نویسندگان از همکاری مرکز تحقیقات آیرودینامیک قدر دانشگاه امام حسین(ع) در انجام این تحقیق، به‌ویژه آقای مهندس حقیری تشکر و سپاس خود را اعلام می‌دارند.

مراجع

1. Shyy, W., Berg, M., and Ljungqvist, D., “Flapping and Flexible Wings for Biological and Micro Air Vehicles”, Progress in Aerospace Science, Vol. 35, pp. 455-505, (1999).
2. Combes, S. A., and Daniel, T. L., "Into Thin Air: Contributions of Aerodynamic and Inertial-Elastic Forces to Wing Bending in The Hawkmoth Manduca Sexta", *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 206, pp. 2999-3006, (2003).
3. Benedict, M., "Aeroelastic Design and Manufacture of an Efficient Ornithopter Wing", Dual Degree Project Report, Dep. of Aerospace Eng., Indian Institute of Technology, (2004).
4. DeLaurier, J. D., "The Development of an Efficient Ornithopter Wing", *Aeronautical Journal*, Vol. 97, pp. 153-162 (1993).
5. Pornsin-sirirak, N. T., Tai, Y. C., Nassef, H., and Ho, C. M., "Titanium-Alloy MEMS Wing Technology for a Micro Aerial Vehicle Application", Sensors and Actuators, Vol. 89, pp. 95-103 (2001).
6. Ho, S., Nassef, H., Pornsinsirirak N., Tai, Y. C., and Ho, C. M., "Unsteady Aerodynamics and Flow Control for Flapping Wing Flyers", Progress in Aerospace Sciences, Vol. 39, pp. 635–681 (2003).
7. Lin, C. S., Hwu, Ch., and Young, W. B., "The Thrust and Lift of an Ornithopter’s Membrane Wings with Simple Flapping Motion", Accepted in Aerospace Science and Technology.

۸. ابراهیمی؛ عباس و مظاهری؛ کریم، "روش نظریه نواری در تحلیل نیروهای آیرودینامیکی وارد بر بال یک بال‌زن"، دهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، یزد، (۱۳۸۵).

۹. ابراهیمی؛ عباس و مظاهری؛ کریم، "تحلیل آیرودینامیک بال‌زدن در جریان ناپایای غیرلزج سه‌بعدی"، شانزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، اردیبهشت (۱۳۸۷).

۱۰. کریمیان؛ سعید، شیدایی؛ آزاده، ابراهیمی؛ عباس، اخوت؛ سلمان و دهقانی؛ مهری، "طراحی اولیه بال‌زن تدبیر"، مرکز رشد دانشگاه صنعتی شریف، تدبیرگران سامانه‌های انرژی، TR-01-A1-10، (۱۳۸٤).